

# 加油站油罐机械清洗抽吸置换研究

祁刚 (中国石油天然气管道局维抢修分公司, 河北 廊坊 065001)

**摘要:** 针对加油站埋地油罐及其他小型密闭容器的机械清洗施工需求, 提出抽吸油罐内混合油气, 同时导入罐外新鲜空气的工艺, 完成可燃气体置换, 保障机械清洗施工安全。采用了数值模拟技术模拟抽吸置换全过程, Gambit2.4.6 对油罐进行三维几何建模, Fluent17.0 求解雷诺平均质量、动量、能量守恒方程, 通过空气质量占比云图、空气质量分数三维展示图等形象展示抽吸速率分别为  $5\text{m}^3/\text{min}$ 、 $10\text{m}^3/\text{min}$  时油罐内混合油气置换情况。模拟结果表明, 在抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$ , 置换时间为 19min 以上工况下, 可以将罐内可燃气体浓度控制在爆炸下限以下, 油罐机械清洗可以安全施工。

**关键词:** 可燃气体置换; 数值模拟; 抽吸速率; 置换时间; 爆炸下限

近年来, 国内加油站存量逾 10 万座, 为保证油品质量和满足储油罐升级改造需求, 加油站埋地油罐及其他小型密闭容器的机械清洗作业较为频繁。鉴于此, 提出了通过抽吸油罐内混合油气, 同时导入罐外新鲜空气, 持续控制气相空间可燃气体浓度在爆炸下限以下, 消除“燃烧三要素”中的可燃物, 来保障机械清洗施工安全。采用了基于计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD)<sup>[1]</sup> 的数值模拟技术模拟抽吸置换全过程, 了解不同抽吸速率下油罐内可燃气体置换情况。

## 1 抽吸置换模型建立及设置

**抽吸置换方案:** 采用的抽吸设备需要具备一定的抽吸量, 通过抽吸油罐内部混合油气, 同时导入罐外的新鲜空气, 以达到置换罐内可燃气体的目的, 在整个清洗作业期间将罐内的可燃气体浓度控制在爆炸下限以下, 保障机械清洗安全进行。因抽吸可燃油气-导入新鲜空气-气体稀释扩散过程比较复杂, 特此采用了数值模拟技术来模拟该过程。

### 1.1 模型建立

①设定储油罐为加油站最常见的  $50\text{m}^3$  油罐, 将罐体简化为一个圆柱体与两个半球体的组合体, 方便建立物理模型和划分网格; ②罐内气体初始时按照 100% 汽油蒸汽计算; ③为方便模拟计算, 储罐内气体置换率用空气的平均质量分数来表示。汽油蒸汽爆炸下限为 1.1% (体积浓度)<sup>[2]</sup>, 换算质量分数为 3.4%, 即罐内气体置换率超过 96.6% 可视为安全作业环境。

### 1.2 计算 / 模拟条件

①在抽吸速率分别为:  $5\text{m}^3/\text{min}$  和  $10\text{m}^3/\text{min}$  的情况下计算可燃气体的置换情况; ②以上述 2 个抽吸速率各抽吸 30min 后, 图示给出罐内可燃气体浓度分布 / 流动情况, 以判断是否存在死角或置换不良的区域。

### 1.3 数理模型

气体的流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。实际流体流动过程几乎都会形成湍流, 虽然 N-S 方程组能够准确地描述湍流流动发生的细节, 但是在数值模拟时, 直接计算需要极大的计算机运存和大量时间。工程上一般采用雷诺平均 N-S 方程组来简化湍流过程。

由于采用了平均, 使得流动过程丢失了很多湍流信息, 因此, 引入 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型来描述湍流细节。

### 1.4 模型求解

建模使用的主要工具为 Gambit2.4.6 和 ANSYS Fluent 17.0。利用 Gambit2.4.6 对罐进行三维几何建模, 并对入口、出口核心区域进行加密。利用 Fluent17.0 来求解雷诺平均质量、动量、能量守恒方程。其中, Fluent17.0 具有并行计算和 GPU 加速等提高计算速度的特性, 这两个特性很好的解决了三维数值模拟计算量大的问题。后处理软件使用 Tecplot 360 2013R1。

#### 1.4.1 计算域边界条件与网格划分

将抽吸管入口设为速度出口边界条件, Fluent17.0 中没有速度出口边界条件, 将速度入口边界条件 (Velocity-inlet) 设置为负值即可。由于储罐处在大气压下, 进气口处设置为压力边界条件 (Pressure-inlet), 其余边界都按壁面边界条件 (Wall) 处理。

采用 CFD 前处理软件 Gambit2.4.6 划分计算域网格。网格质量的好坏直接影响模拟结果的准确性, 由于计算域某些区域的湍流剧烈、浓度场变化较大所以在划分网格时要对特定区域如入口和出口出进行加密处理。

为实现在保证网格质量的基础上实现对特定区域的加密处理, 在应用 Gambit2.4.6 划分网格时先将计算域分块处理 (Domain Decomposition), 将入口和出口网格尺度为 0.01m, 最大尺寸 0.1m。初始生成 555817 个四面体控制容积, 此后在 Fluent17.0 中进行计算之后再对流场变化剧烈的区域进行自适应加密 (Grid Adaption Controls)。

#### 1.4.2 求解参数设置

当置换开始时, 为反应组分浓度场随时间的变化关系, 采用非稳态求解, 迭代的时间步长设置为 5s。由于置换过程流场速度较低, 并且气体主要处于大气压状态, 求解方法选择基于压力的求解法 (Pressure based) 进行求解。湍流模型选择 Realizable  $k-\varepsilon$  来描述湍流发展。求解算法选择半隐式连接压力的 SIMPLE 算法来耦合压力场和速度场。梯度插值方案选择基于单元体的最小二乘法插值 (least-Square Cell Based)。动量方程、能量

方程、组分方程选用二阶迎风格式离散、其他方程采用一阶迎风格式离散，松弛因子采用默认设置。从入口界面对流场进行初始化，收敛标准设定连续性方程的残差小于  $10^{-4}$ ，能量方程残差小于  $10^{-6}$ 。

## 2 数值模拟计算结果及分析

### 2.1 抽吸速率为 $5\text{m}^3/\text{min}$ 时计算结果及分析

①根据模拟结果，在抽吸速率为  $5\text{m}^3/\text{min}$  时，抽吸 30min 的置换率为 94.2%，这说明在此抽吸速率下，若想达到良好的置换效果，需延长抽吸时间；②抽吸 30min 后的储罐中空气质量分数各个部分都到了 90% 以上，但效率变低，效果不理想。

### 2.2 抽吸速率为 $10\text{m}^3/\text{min}$ 时计算结果及分析

当抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时，其置换率随时间变化如表 1 所示。

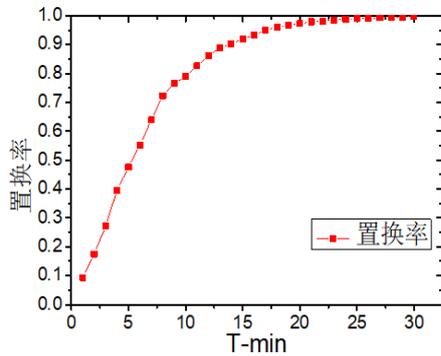


图 1 抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时置换率与时间的关系

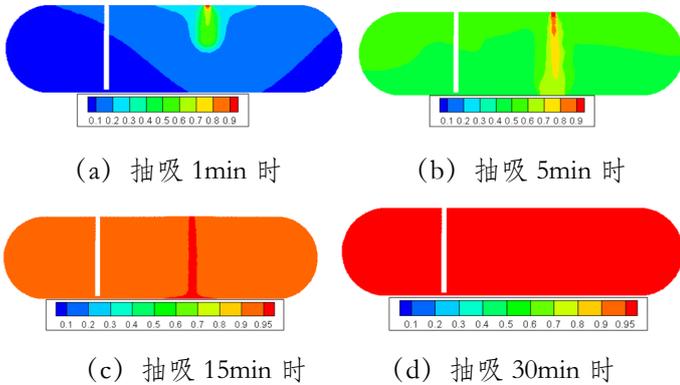


图 2 抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时空气质量分数云图

当抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时，分别生成 1min、5min、15min、30min 时储罐中间截面的空气质量占比 (Mass

表 1 抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时置换率变化表 (单位: %)

11min	12min	13min	14min	15min	16min	17min	18min
82.7	86.2	88.9	90.3	92.0	93.4	95.0	96.1
19min	20min	21min	22min	23min	24min	25min	26min
96.8	97.3	97.9	98.2	98.5	98.8	99.0	99.1
27min	28min	29min	30min				
99.3	99.5	99.6	99.7				

fraction of air) 云图，见图 2。

在抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时，抽吸 30min 时的三维展示图如图 3。

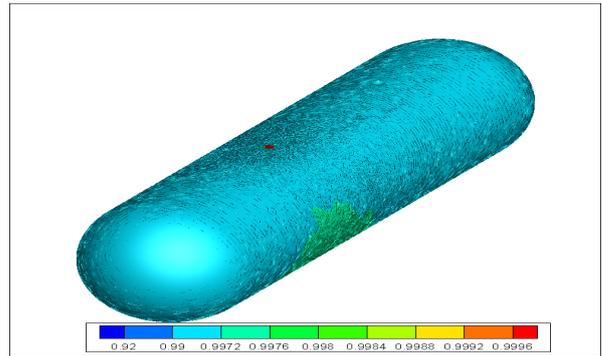


图 3 抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时空气质量分数三维展示图

### 2.3 结果分析

①根据模拟结果，在抽吸速率为  $10\text{m}^3/\text{min}$  时，抽吸 30min 的置换率为 99.7%，置换效果良好；②由三维展示图可以看到，抽吸 20min 以后，储罐内部的空气质量分数整体达到了 97.3% 以上，无死角出现，汽油蒸汽浓度在爆炸下限以下，可视为安全作业环境。

## 3 结论

通过数值模拟技术，油罐内可燃气体抽吸置换情况已基本清楚。在加油站埋地油罐及其他小型密闭容器的机械清洗施工中，通过抽吸置换控制罐内可燃气体浓度在爆炸下限以下，消除“燃烧三要素”中的可燃物，可有效避免火灾、闪爆等安全事故，保障施工安全。同时具有置换速度快、效果持续稳定等特点，值得推广应用。

### 参考文献:

- [1] 宋晨光, 郑源, 姜镐, 赵振宙, 李冲. 垂直轴风机 CFD 模拟的网格划分策略和湍流模型研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2080-2087.
- [2] 中石化广州工程有限公司. GB/T 50493-2019 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

### 作者简介:

祁刚 (1977-), 2013 年毕业于中国石油大学 (华东) 油气储运工程专业, 工程师, 现主要从事储油罐机械清洗、检测、维修施工及工艺评价工作。